

IMPACTOS DA OCUPAÇÃO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NA CARGA DE LAVAGEM

Evaldo Miranda Coiado¹ & Maria Rejane Lourençoni Siviero²

RESUMO --- Apresenta-se neste trabalho uma análise da relação entre a carga de lavagem que passa por uma seção de medições, e a quantidade de sedimentos produzida, por processos erosivos, na bacia hidrográfica contribuinte. Para avaliar os impactos da ocupação e conservação do solo na carga de lavagem foram utilizados dados referentes a 1993 e 1999. A carga de lavagem foi calculada subtraindo da carga total medida a carga total do leito determinada por cinco métodos selecionados com critério. A quantidade de sedimentos produzida na bacia hidrográfica foi calculada utilizando a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). Concluiu-se que nos anos de 1993 e 1999 a carga de lavagem representou 74,8% e 70,0%, respectivamente, da carga total medida. Somente 5,90% dos sedimentos produzidos na bacia hidrográfica contribuinte passaram pela seção de medições em 1993, e em 1999 passaram 19,12%. Embora em 1999 a precipitação anual foi inferior à de 1993, ocorreu um aumento expressivo da carga de lavagem na seção de medições. Isto se deveu ao fator chuva que teve um acréscimo de 14,6% de 1993 para 1999, e ao incremento da área urbana que teve um aumento de 50% no intervalo de 1993 a 1999.

ABSTRACT ---Presents in this paper one analysis on the percentual relation between the wash load, which goes through at a gauging station and the amount of soil lost from the watershed by erosion mechanics. To evaluate the use and occupation land impacts it was used dates measured in 1993 and 1999. The wash load discharge was considered the difference between the total discharge measured and the total bed load computed. It was used the Universal Soil Loss Equation (USLE) to estimate the amount of soil lost from the watershed. One concluded that in 1993 the wash load represented 74,8% of the total discharge measured and in 1999 the wash load represented 70% of the total discharge measured. Only 5,90% the amount of soil lost from the watershed goes through at a gauging station in 1993, and it was 19,12% in 1999. Although, it had rained less in 1993 than 1999, it was observed an increase of the wash load going though at a gauging station. This can explained by two main reasons: a) the rainfall factor had increased 14,6% from 1993 to 1999; b) the urban watershed area had increased 50% from 1993 to 1999.

Palavras-chave: Impactos, ocupação e conservação do solo, carga de lavagem.

1) Professor da Faculdade Politécnica de Jundiaí, SP, e das Faculdades Integradas Einstein de Limeira, SP. Av. Jorge Tibiriçá, 1111, Campinas, SP, 13045-705. e-mail: emcoiado@yahoo.com.br.

2) Pós-Doutora pela FEAGRI/UNICAMP, Campinas/SP, Fone: (19) 38811753, e-mail: rsiviero@hotmail.com

1 – INTRODUÇÃO

A quantidade de solo erodido pelo escoamento superficial, resultante de eventos pluviosos, está fortemente associada à ocupação da terra e ao estado de conservação do solo.

As bacias hidrográficas conservadas sejam pela vegetação natural, sejam por técnicas conservacionistas, em menores quantidades, também são capazes de produzir sedimentos devido à erosão hídrica (laminar ou por sulco).

As modalidades de erosão, na bacia hidrográfica, podem ser agravadas pela influência do homem através dos desmatamentos desordenados, construções em geral, mineração descontrolada e atividades agrícolas inadequadas. Como resultado têm-se os efeitos patológicos ao meio ambiente que vão desde a alteração da qualidade da água dos rios às enchentes provocadas pelo assoreamento dos canais da rede de drenagem. Verificam-se ainda reduções do volume de armazenamento de água nos reservatórios pelo acúmulo de sedimentos, gerando inúmeros outros impactos ambientais e econômicos.

Em relação à dinâmica do transporte de sedimentos em rios, a literatura disponível apresenta a seguinte classificação: carga do leito, carga do leito transportada em suspensão, carga total do leito, carga de lavagem, e carga total.

Parece haver consenso na literatura de que a carga de lavagem não pode ser definida pela capacidade de transporte do rio, uma vez que ela é fornecida pelas águas de montante. Ou seja, a carga de lavagem está associada aos sedimentos emitidos pela bacia hidrográfica contribuinte enquanto as demais fazem parte do equilíbrio dinâmico do rio.

Apresenta-se neste trabalho uma análise da relação entre a carga de lavagem que passa por uma determinada seção de medições de um rio, e a quantidade de sedimentos emitidos pela bacia hidrográfica contribuinte.

A estimativa dos sedimentos emitidos pela bacia hidrográfica foi feita utilizando a Equação Universal de Perda de Solo. A carga de lavagem foi obtida subtraindo da carga total medida na seção em estudo a carga total do leito. Para o cálculo da carga total do leito foram utilizados cinco métodos e equações disponíveis na literatura.

Para avaliar o impacto da ocupação e conservação do solo na carga de lavagem, foram utilizados dados dos anos de 1993 e 1999. Neste período, ao longo da bacia hidrográfica, houve um crescimento urbano expressivo.

Foram selecionadas, para o estudo, uma seção do rio Atibaia, localizada no município de Campinas-SP, e a bacia hidrográfica contribuinte.

2 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2.1 – Carga de lavagem

Na literatura existe uma grande quantidade de equações e métodos para estimar a carga sólida transportada pelos rios, porém, a aplicabilidade de cada uma dessas equações fica limitada às condições de origem. Um grupo de equações é limitado ao cálculo da carga do leito (= arraste+saltitação+rolamento). Outro grupo é adequado ao transporte da carga total do leito (= carga do leito + carga do leito suspensa). Esses dois grupos não consideram a carga de lavagem, necessitando para o conhecimento da carga total (carga total do leito + carga de lavagem) de um terceiro grupo de equações, que via de regra, originam-se de medições realizadas no próprio curso de água. As equações do terceiro grupo, por serem desenvolvidas a partir de medições em campo, não fazem a distinção entre as modalidades de transporte, de modo que não permitem quantificar a carga de lavagem. Nascimento et al. (2000).

Chow (1964) afirma que na maioria dos rios, a carga de sedimento transportada é constituída predominantemente por carga de lavagem. Chow estima que o valor da carga de lavagem possa estar compreendido entre 80% a 90% da carga total.

Colby (1963), segundo Graf (1971), mostra que a maioria dos sedimentos transportados por um curso de água aluvial é carga de lavagem, e assim, as teorias do transporte do leito são úteis, mas inadequadas para o cálculo da carga sólida total.

De investigações experimentais realizadas em rios da costa Atlântica nos Estados Unidos da América, Guy (1964), segundo Graf (1971), encontrou que a carga do material grosseiro (aproximadamente idêntico ao material da carga do leito), é em geral muito menor que a metade da carga total (carga total do leito + carga de lavagem).

Shen e Hung (1971), segundo Álvarez e Flores (1996), consideraram que a carga de lavagem deveria ter um tamanho menor ou igual ao D_{10} da curva granulométrica da carga do leito.

Geralmente a carga de lavagem é definida como os sedimentos transportados pelo fluxo com diâmetro inferior a 0,0625 mm. Raudkivi (1976).

Segundo Simons e Sentürk (1992), a carga de lavagem não pode ser definida pela capacidade de transporte do rio, uma vez que ela é fornecida pelas águas de montante. Portanto, as equações que incorporam as características hidráulicas do rio e que definem a capacidade de transporte, não estimam a carga de lavagem. Isto ocorre com todas as equações de base teórica.

A carga de lavagem é a parte da carga de sedimentos composta de partículas com tamanhos menores do que aquelas encontradas em grandes quantidades e em movimento no fundo do rio. Figueiredo (1993).

O tamanho limite dos sedimentos da carga de lavagem pode ser escolhido arbitrariamente a partir da análise granulométrica do material do fundo, sendo esta, representada por 10% dos materiais mais finos encontrados no fundo do rio. Einstein (1950), segundo Figueiredo (1993).

A carga de lavagem é formada por material muito fino que é transportado em suspensão e que não se encontra representado no material do fundo do rio. Ao considerar uma determinada seção, todo material da carga de lavagem origina dos trechos do rio a montante. Sua origem encontra-se no solo da bacia erodido pelas gotas de chuva, ou origina-se da erosão que o próprio rio provoca em suas margens. Alvarez e Flores (1996).

Quando não se conhece o tamanho das partículas do fundo, aquelas transportadas em suspensão menores que 0,062mm são consideradas material da carga de lavagem. Alvarez e Flores (1996).

A magnitude da carga de lavagem transportada por um curso de água depende principalmente do suprimento de sedimentos pela bacia hidrográfica contribuinte e não da hidráulica do rio. Conseqüentemente, é difícil avaliar a carga de lavagem a partir das características hidráulicas do rio. A maioria das equações de carga total é, na verdade, equações que determinam a carga total do material do leito. Para comparar os valores das cargas totais do material do leito medidos e calculados, deve-se antes da comparação, subtrair o valor da carga de lavagem daqueles medidos. Yang (1996).

Brea e Spalletti (1998), de suas investigações sobre a carga de sedimentos transportada pelos rios Iruya e Pescado, localizados na bacia do Rio Bermejo, parte da bacia hidrográfica do Prata, na Argentina, verificaram cargas medidas da ordem de 5,5 vezes a calculada. Esta diferença, com certeza, trata-se da carga de lavagem.

Eckhardt (1998) desenvolveu uma pesquisa experimental a respeito da carga sólida transportada pelo ribeirão do Rato e rio Ivaí, região noroeste do Estado de Paraná. No caso do rio Ivaí, as estimativas das cargas sólidas por Toffaleti (1969), forneceram valores bem inferiores aos das medições diretas. Esta inferioridade se deve a carga de lavagem não considerada.

Nascimento et al. (2000) utilizando os métodos de Einstein (1950), Toffaleti (1969) e Van Rijn (1984), no cálculo da carga total do leito, verificaram que na média a carga de lavagem vale, respectivamente, 96,8%; 82,6%; 92,5%, da carga total transportada pelo rio estudado, na seção considerada.

Nascimento e Coiado (2000) utilizando os métodos de Laursen (1958), Shen e Hung (1971), e Ackers e White (1972-73), no cálculo da carga total do leito, verificaram que na média a carga de lavagem vale, respectivamente, 84,2%, 96,0%, e 80,9%, da carga total transportada pelo rio estudado na seção considerada.

2.2 – Métodos utilizados para se estimar a carga total do leito

A carga total do leito foi calculada utilizando cinco métodos dentre aqueles que permitem estimar a carga total do leito sem separar os componentes. O critério principal adotado para a seleção dos métodos foi o intervalo granulométrico do material do leito estabelecido por cada um dos métodos, exceto os métodos: Yang (1973) que além do tamanho do material do leito foram utilizados os parâmetros velocidade média e inclinação da linha de água; e Graf e Acaroglu (1968) que além do tamanho médio do material do leito utilizou-se a tensão de cisalhamento adimensional.

Os métodos selecionados foram: Colby (1964), Engelund y Hansen (1967), Shen e Hung (1972), Graf e Acaroglu (1968), e de Yang (1973). Todos estes métodos encontram-se em Álvarez e Flores (1996), Garde e Raju (1985), Graf (1971), Simons e Sentürk (1992), e Yang (1996),

2.2.1 – Método de Colby (1964)

O método de Colby foi baseado em dados experimentais obtidos em vários rios: Niobrara ($D_{50}=0,28\text{mm}$), Middleloup ($D_{50}=0,32\text{mm}$), Mississipi ($D_{50}=0,2$ a $0,7$ mm), Grande ($D_{50}=0,2$ a $0,3$ mm), e ribeirão Pigeon Roost ($D_{50}=0,4\text{mm}$).

$$g_{BT} = g_{BT0} [1 + (k1.k2 - 1)k3] \dots\dots\dots(1)$$

Na qual:

$k1$, $k2$ y $k3$ (valores obtidos de gráficos);

g_{BT0} (valores obtidos de gráfico em função da velocidade média do escoamento).

$$G_{BT} = g_{BT} . B \dots\dots\dots(2)$$

Limites de aplicação:

Para estimar a carga total do leito constituído de areias com diâmetros médios entre 0,1 a 0,8 mm.

2.2.2 – Método de Engelund y Hansen (1967)

Baseado em parâmetros adimensionais e em dados experimentais referentes a leitos constituídos de areias.

$$g_{BT} = \frac{0,05 \cdot \gamma_s \cdot V^2 \cdot \tau_0^{3/2} \cdot \gamma^{1/2}}{g^{1/2} (\gamma_s - \gamma)^2 D_{50}} \dots\dots\dots(3)$$

$$G_{BT} = g_{BT} . B \dots\dots\dots(4)$$

Limites de aplicação:

Para areias em que D_{50} seja maior que 0,15 mm, e o desvio padrão geométrico da amostra seja menor que 2, ($\sigma_g < 2$).

2.2.3 – Equação de Shen e Hung (1972)

A partir da análise de 587 dados utilizando series de Taylor, estimaram os parâmetros de um sistema não linear e chegaram na equação. Não consideram a condição de início do movimento das partículas. Shen e Hung supuseram que a carga de lavagem é constituída por partículas de tamanho inferiores a 0,0625 mm, e foram retiradas das amostras. Utilizaram dados de vários outros pesquisadores, inclusive os dados de Gilbert (1914), segundo Álvarez e Flores (1996).

$$\log \bar{C}_T = -107.404,5 + 324.214,7.Y_* - 326.309,6.Y_*^2 + 109.503,9.Y_*^3 \dots\dots\dots(5)$$

Na qual:

$$Y_* = \left(\frac{V.S^{0,572}}{W_{Dm}^{0,32}} \right)^{0,0075} \dots\dots\dots(6)$$

$$\log \bar{C}_T = \Pi \dots\dots\dots(7)$$

$$\bar{C}_T = 10^{\Pi-3} \dots\dots\dots(8)$$

$$g_{BT} = q.10^{\Pi-3} \dots\dots\dots(9)$$

$$G_{BT} = q.10^{\Pi-3}.B \dots\dots\dots(10)$$

Limites de aplicação:

Para sedimentos com diâmetro médio representado pelo D₅₀ entre 0,13 a 1,3 mm.

2.2.4 – Método de Graf e Acaroglu (1968)

Consideraram: a) o empuxo do fluxo sobre a partícula de sedimento; b) o peso submerso da partícula; c) a velocidade média do escoamento; d) a tensão de cisalhamento que atua no fundo do canal; e) parâmetros adimensionais que intervêm no transporte total do fundo. Graf e Acaroglu utilizaram dados obtidos por vários outros pesquisadores entre eles os de Gilbert (1914), segundo Álvarez e Flores (1996).

Para ($\sigma g \leq 3$):

$$g_{BT} = 10,39.\gamma_s \left(g \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) D_m^3 \right)^{1/2} \tau_*^{2,52} \dots\dots\dots(11)$$

Para ($\sigma g > 3$):

$$g_{BT} = 10,39.\gamma_s \left(g \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \right)^{1/2} \sum \frac{pi}{100} D_i^{3/2} \tau_*^{2,52} \dots\dots\dots(12)$$

$$\tau_* = \frac{\gamma \cdot R_h \cdot S}{(\gamma_s - \gamma) D_m} \dots\dots\dots(13)$$

$$G_{BT} = g_{BT} \cdot B \dots\dots\dots(14)$$

Na qual:

$$D_i = (D_{imin} \cdot D_{imax})^{1/2} ;$$

p_i em porcentagem.

Limites de aplicação:

Para sedimentos com peso específico igual a 2650 kg/m³. Para areias com diâmetros entre 0,091mm a 2,78mm.

Recomenda-se aplicar o método dentro do intervalo $0,06 \leq \tau_* \leq 6,5$.

2.2.5 – Método de Yang (1973)

Considerou a potencia unitária do escoamento, definida como sendo o produto da velocidade média (V) pela inclinação hidráulica (j). O produto (V.j) é obtido da relação entre a energia consumida por peso unitário de água. Em 1973 Yang utilizou 462 dados obtidos por diferentes pesquisadores em canais de laboratórios e rios, com os quais efetuou a análise de regressão múltipla chegando numa relação que considerava a velocidade crítica do escoamento (Vc). Em 1979 fez uma nova análise de regressão múltipla com 1093 dados, obtidos em canais de laboratório, e 166 dados, obtidos em rios. Concluiu que quando as concentrações são maiores de 20 ppm pode-se desprezar o termo que contém (Vc), assim, a equação de 1973 foi simplificada para:

$$\log \bar{C}_T = 5,165 - 0,153 \cdot \log \frac{W_0 \cdot D_m}{\nu} - 0,297 \cdot \log \frac{U_*}{W_0} + \left(1,78 - 0,36 \log \frac{W_0 \cdot D_m}{\nu} - 0,48 \cdot \log \frac{U_*}{W_0} \right) \cdot \log \left(\frac{V \cdot S}{W_0} \right) \dots\dots\dots(15)$$

$$\log \bar{C}_T = \Pi \dots\dots\dots(16)$$

$$\bar{C}_T = 10^{\Pi-3} \dots\dots\dots(17)$$

$$g_{BT} = q \cdot 10^{\Pi-3} \dots\dots\dots(18)$$

$$G_{BT} = q \cdot 10^{\Pi-3} \cdot B \dots\dots\dots(19)$$

Limites de aplicação:

Utilizou dados de Gilbert (1914), segundo Álvarez e Flores (1996), e de vários outros pesquisadores, com as seguintes características hidráulicas, geométricas e de sedimentos: D_m do material desde 0,15 mm a 1,71 mm; rugosidade relativa, D_m/d de 0,000022 a 0,0164; velocidade

média do escoamento de 0,23 m/s a 1,97 m/s; inclinação de 0,000043 m/m a 0,0279 m/m; concentração, em ppm em peso, de 10 a 585000.

Quadro 1 – Símbolos utilizados nas equações de (1) a (19) e as unidades.

Símbolo	Significado	Unidades
C_T	Concentração total dos sedimentos da camada do leito	ppm
$D_{50}=D_m$	Diâmetro médio	m
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
g_{BT}	Carga total do leito por unidade de largura do rio	kgf/s.m
g_{BT0}	Carga total do leito por unidade de largura do rio para águas limpas à temperatura de 15.56 ⁰ C, tiradas de gráfico	kgf/s.m
G_{BT}	Carga total do leito	kgf/s
k1, k2, k3	Constantes de Colby tiradas de gráficos	1
q	Vazão líquida específica	m^2/s
R_h	Raio hidráulico	m
S	Inclinação da linha de água do curso de água	m/m
U^*	Velocidade de atrito	m/s
V	Velocidade média do escoamento	m/s
$W_{Dm}=W_0$	Velocidade de sedimentação na água em repouso	m/s
σg	Desvio padrão geométrico.	1
γ, γ_s	Peso específico da água e dos sedimentos, respectivamente.	kgf/m ³
ν	Viscosidade cinemática da água	m^2/s
τ_0	Tensão de cisalhamento do fluxo sobre o leito	kgf/m ²
τ^*	Tensão de cisalhamento adimensional	1

2.3 – Método utilizado para se estimar a carga de lavagem

Obtém-se a carga de lavagem utilizando a seguinte equação:

$$G_{LV} = G_{TM} - G_{BT} \dots\dots\dots(20)$$

Na qual:

G_{LV} = carga de lavagem;

G_{TM} = carga total medida (=carga total do leito + carga de lavagem);

G_{BT} = carga total do leito estimada utilizando equações ou métodos.

2.4 – Equação Universal de Perda de Solo

Em 1954, no "Runoff and Soil - Loss Data Center", do "Agricultural Research Service", com sede na Universidade de Purdue - EUA, foi desenvolvida a atual equação de perdas de solo, cujo aperfeiçoamento resultou da reunião e interpretação analítica dos dados básicos de perdas de solo e de água disponíveis em vários locais dos EUA, sob orientação de W. H. Wischmeier. Wischmeier e Smith (1978).

Entre 1956 e 1965 foram acrescentados milhares de dados o que tornou ainda mais válida a equação.

Contudo, as primeiras conclusões não levavam em consideração o fator referente à chuva. Em 1965, com a inclusão do fator, a equação tomou a sua forma definitiva incorporada por Wischmeier e Smith.

Segundo Wischmeier e Smith (1978), várias melhorias importantes foram introduzidas na equação, tais como: um índice de erosão de chuva; um método de avaliar os efeitos do manejo e cultura com vistas às condições climáticas locais; um fator quantitativo de erodibilidade do solo; um método que leva em conta os efeitos de inter-relações de certas variáveis: nível de produtividade, seqüência de culturas e manejo dos resíduos.

Em consequência das melhorias acima citadas, a equação superou as restrições climáticas e geográficas, próprias dos primeiros estudos, passou a designar-se Equação Universal de Perda de Solo, devido à sua aplicação generalizada.

Segundo Bertoni e Lombardi (1990), os trabalhos iniciais sobre a Equação Universal de Perda de Solo, no Brasil, foram desenvolvidas por Bertoni et al., utilizando dados existentes para as condições do Estado de São Paulo. A partir de 1975, vários autores vêm tentando avaliar os fatores da equação para outras regiões de solos tropicais.

A Equação Universal de Perda de Solo é dada por:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \dots\dots\dots(20)$$

Na qual:

A= perda de solo calculada por unidade de área, em [t/(ha.ano)];

R= fator chuva: índice de erosão devido à chuva, em [MJ.mm/(ha.h)];

K= fator de erodibilidade do solo, em [t.h/(Mj.mm)];

LS = fator conjunto de comprimento e grau de declive;

L= fator relativo ao comprimento do declive: relação de perdas de solo entre um comprimento de declive qualquer e um comprimento de rampa de 25 m para o mesmo solo e grau de declive;

S= fator grau de declive: relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa;

C= fator de uso e manejo: relação entre perdas de solo de um terreno cultivado, em dadas condições, e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto, isto é, nas mesmas condições em que o fator K é avaliado;

P= fator prática conservacionista: relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática e as perdas quando se planta morro abaixo.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – A seção de medições

A seção de medições, pertence ao rio Atibaia, principal afluente do rio Piracicaba-SP. A área da bacia hidrográfica contribuinte é de 934,7 km², e está localizada entre o Distrito de Sousas / Campinas / SP e a Barragem do Município de Atibaia / SP. O trecho do rio Atibaia, a montante da seção de medições, tem uma extensão de 71,9 km.

3.2 - Hidrometria

A vazão líquida foi determinada através da somatória, dos produtos das sub-áreas de influência pelas velocidades médias medidas nas verticais correspondentes. A seção transversal, com aproximadamente 35 metros de largura foi dividida em sete sub-áreas por se tratar de uma seção simétrica regular. Estabeleceu-se para cada uma das sub-áreas uma vertical. A velocidade média de cada vertical foi medida com um micro-molinete fluviométrico, marca OTT, posicionado a 0,60.D (D=profundidade total, onde a referência foi a superfície da água).

Para a determinação da declividade da linha de água foram instaladas duas réguas linimétricas. Uma posicionada à jusante e outra localizada à montante da seção de medições, distanciadas de aproximadamente 600 m.

3.3 - Sedimentometria

Para a determinação da carga sólida total suspensa, de cada vertical foram coletadas amostras, por amostragem do tipo integrada, utilizando um amostrador do tipo USDH-59.

Para a determinação da concentração dos sólidos em suspensão, de cada amostra coletada pelo amostrador, foram retirados um volume de 200 mL após homogeneização adequada. Este volume foi então filtrado, sob vácuo, em filtro de fibra de vidro, tipo WHATMAN GF/C, com porosidade de 1,2 µm. A concentração de sólidos suspensos totais (em mg/L) é o resultado da divisão da massa retida no filtro (seco em estufa a 103°C durante 24 horas) pelo volume de amostra filtrada.

A carga do leito foi medida pelo método direto, utilizando um amostrador do tipo ARNHEM - BTMA. O processo de medição consiste em fazer descer o aparelho ao fundo, deixando-o nesta posição por um determinado período, e recolhendo-o posteriormente.

Determinaram-se as curvas granulométricas do material do leito a partir das amostras de sedimentos coletadas do leito do rio por uma draga do tipo PETERSEN com capacidade de 1,5 litro.

A granulometria do material sólido em suspensão foi determinada utilizando o método do tubo de remoção pelo base, segundo metodologia apresentada por Carvalho (1994).

3.4 – Anos de medições

Para investigar o impacto da ocupação e conservação do solo da bacia hidrográfica contribuinte na carga de lavagem, foram feitas medições utilizando a mesma metodologia nos anos de 1993 e 1999.

3.5 - Parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo

3.5.1 – Banco de dados

Segundo Siviero (2003), os materiais utilizados para a composição do banco de dados foram: a) Cartas Topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), escala 1:50.000 (Folhas: Campinas, Valinhos, Indaiatuba, Jundiaí, Bragança Paulista, e Atibaia); b) Carta de Solos do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (IAC) – Instituto Agrônomo de Campinas) – EMBRAPA, escala 1:500.000, ano 1999; c) Mapa Rodoviário da Regional de Campinas-SP – DR1 (Departamento de Estradas de Rodagem – DER), escala 1:250.000, anos de 1999/2000 (Forma digital – vetorial); d) Imagem Satélite LANDSAT5, órbita/ponto 219/76 W, bandas TM3, TM4, e TM5 de 1993 em BSQ (*Streamer*) e bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM6, e TM7 de 1999 em CD (Formato INPE); e) Precipitação mensal dos postos meteorológicos: IAC-Campinas e DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) de 1993 e 1999.

3.5.2 – Escala de trabalho

O trabalho foi elaborado na escala 1:50.000. Todas as bases cartográficas, incluindo aquelas em formato digital, foram ajustadas para esta escala. Barros (1996), segundo Siviero (2003), sugere para produtos cartográficos na escala 1:50.000, uma faixa de resolução espacial entre os valores 7,5 a 40 metros, salientando que na prática os estudos que utilizam produtos orbitais de sensoriamento remoto (LANDSAT – resolução espacial aproximadamente igual a 30 x 30m), adota-se esse tamanho de pixel como referência aos demais planos de informação. Siviero (2003).

3.5.3 – Digitalização

A digitalização foi realizada por meio de rasterização do material cartográfico e, este submetido ao processo de vetorização semi-automática no “software” ACADMAP/Overlay. Siviero (2003).

3.5.4 – *Elaboração da carta planialtimétrica*

Elaborou-se uma carta com a planialtimetria cartográfica, extraída das cartas cartográficas do IBGE e convertidas do formato analógico para digital vetorial. A partir desta carta em meio digital, utilizando o Idrisi (SIG), foram obtidos os fatores R, LS, e P da EUPS e as áreas dos municípios envolvidos. Siviero (2003).

3.5.5 – *Elaboração da carta tipos de solo*

Foi elaborada uma carta contendo os tipos de solo com base na carta de solos do mapa pedológico do Estado de São Paulo. Com esta carta em meio digital, utilizando o Idrisi (SIG), obteve-se os tipos de solos presentes na área em estudo e o fator K da EUPS. Siviero (2003).

3.5.6 – *Elaboração das cartas de uso da terra*

Para a elaboração das cartas de uso da terra foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, que compreendem o processamento digital de imagens de satélite LANDSAT, em módulos para interpretação automática supervisionada. Os módulos foram gravados a partir das imagens obtidas de 1993 e 1999, a seguir, foram tratados pelos ILWIS (SIG), visando uma maior discriminação entre os diversos tipos de cobertura vegetal e possibilitando a interpretação temática segundo legenda pré-estabelecida. As técnicas de processamento digital de imagem consistiram de: ampliação linear de contraste, filtragem e operações aritméticas entre as bandas. Siviero (2003).

A partir dessas cartas em meio digital, utilizando o Idrisi (SIG), obtiveram-se as classes de uso da terra e o fator C da EUPS, para 1993 e 1999. Siviero (2003).

3.6 - Critérios para a escolha dos métodos utilizados no cálculo da carga total do leito

Após a análise de vários métodos e equações que estimam a carga total do leito, foram selecionados os mais simples e que resultaram frequências maiores dos parâmetros apresentados nas limitações de aplicação de cada método. Os métodos de Colby (1964), Engelund y Hansen (1967), e Shen e Hung (1972) foram selecionados com base no diâmetro médio das amostras de sedimentos coletadas no fundo do rio. O método de Graf e Acaroglu (1968) foi escolhido com base no diâmetro médio (D_{50}) e na tensão de cisalhamento adimensional. O método de Yang (1993) foi selecionado com base no diâmetro médio (D_{50}), na velocidade média do escoamento, e na inclinação da linha de água.

Os intervalos dos principais parâmetros referentes à seção de medições foram: Número de Froude do escoamento (0,02 a 0,26); D_{50} (0,20 mm a 1,50 mm); tensão de cisalhamento do escoamento τ_0 (0,02 kgf/m² a 0,53 kgf/m²); tensão de cisalhamento adimensional τ_* (0,06 a 6,5) velocidade média do escoamento (0,15 m/s a 1,05 m/s); e declividade da linha de água (0,00003 m/m a 0,00026 m/m)

Colby (1964): 80% dos valores dos diâmetros médios (D_{50}) estão no intervalo estabelecido pelo método.

Engelund e Hansen (1967): 100% dos valores dos diâmetros médios (D_{50}) estão no intervalo estabelecido pelo método.

Shen e Hung (1972): 94% dos valores, do diâmetro médio (D_{50}), estão no intervalo estabelecido pelo método.

Método de Graf y Acaroglu (1968): 100% dos valores dos diâmetros médios (D_{50}), e 92% dos valores da tensão de cisalhamento adimensional estão no intervalo estabelecido pelo método.

Método de Yang (1973): 96% dos valores da velocidade média do escoamento, e 100% dos valores da inclinação da linha de água e do diâmetro médio (D_{50}), estão no intervalo estabelecido pelo método.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Integração dos fatores da EUPS

Uma vez obtidos todos os fatores da EUPS (R, K, LS, C e P) para os anos de 1993 e 1999, cada fator foi transformado num plano de informação georeferenciado e transferido para um sistema de informação geográfica (ILWIS). Por meio de operações de cruzamento, reclassificação e multiplicação, obtiveram-se as perdas de solo na bacia hidrográfica contribuinte da seção em estudo do rio Atibaia, para os anos de 1993 e 1999. No Quadro 2 são apresentadas as perdas de solo em t/ha. As médias ponderadas resultantes são: 1993 (7,3 t/ha), 1999 (7,8 t/ha).

Quadro 2 – Perdas de solo em 1993 e 1999.

Perda de solo (t/ha)	Área (%) - 1993	Área (%) - 1999
< 5	76,0	74,1
5 - 10	8,8	9,4
10 - 20	7,6	6,4
20 - 50	5,2	4,7
> 50	3,5	5,3

4.2 – Precipitação média anual (P)

As precipitações médias anuais de 1993 e 1999 foram obtidas utilizando o método de Thiessen. Para toda a bacia hidrográfica contribuinte da seção de medições resultaram os seguintes valores: 1993 (1568,6 mm), 1999 (1257,8 mm).

4.3 – Carga de lavagem

Nas Figuras 1 e 3 apresentam-se as variações dos valores das relações (G_{LV}/G_{TM}) com o número de Froude do escoamento referentes aos anos de 1993 e 1999, respectivamente. Os valores

da carga de lavagem foram calculados utilizando os cinco métodos selecionados. Confrontando as figuras 1 e 3 observa-se uma dispersão maior do número de Froude em 1993 devido ter havido uma frequência maior de valores de vazões menores neste ano. Nos dois anos os valores das relações (G_{LV}/G_{TM}) sofreram uma variação muito grande entre o intervalo zero e a unidade. Observa-se que os valores da relação (G_{LV}/G_{TM}), referentes aos métodos de Shen e Hung (1972) e Graf e Acaroglu (1968), são os que se dispersaram menos, ficando todos muito próximos da unidade. Os métodos de Colby (1964) e Engelund y Hansen (1967) resultaram valores de relações muito dispersas e com comportamentos semelhantes. Os valores da relação da (G_{LV}/G_{TM}), referentes ao método de Yang (1973), são os que apresentaram dispersão menor. Também foi o método em que os valores obtidos mais se aproximaram da média resultante dos valores de todos os métodos utilizados. Portanto, este método é o mais recomendado para o caso estudado.

Nas Figuras 2 e 4 apresentam as frequências dos valores da relação (G_{LV}/G_{TM}), em porcentagens, nos intervalos estabelecidos. Observa-se que as frequências maiores ocorreram no intervalo 0,8 a 1,0. Para o ano de 1993 tem-se que 54,4% dos valores encontram-se neste intervalo, enquanto que para ano de 1999 verifica-se que 58,3% dos valores caíram neste mesmo intervalo.

Nas Figuras 5 e 7 apresentam-se as variações dos valores das relações (G_{LVm}/G_{TM}) com o número de Froude do escoamento referentes aos anos de 1993 e 1999, respectivamente. Neste caso os valores de (G_{LVm}) é a média das cargas de lavagens calculadas utilizando os cinco métodos selecionados. Observa-se que os valores das relações (G_{LVm}/G_{TM}) estão menos dispersos, caindo todos, no intervalo entre 0,5 a 1,0, tanto para o ano de 1993 como para 1999.

Na Figura 6, referente aos valores de 1993, o intervalo de maior frequência foi 0,8 a 0,9, e para 1999, Figura 8, foi o intervalo 0,6 a 0,7.

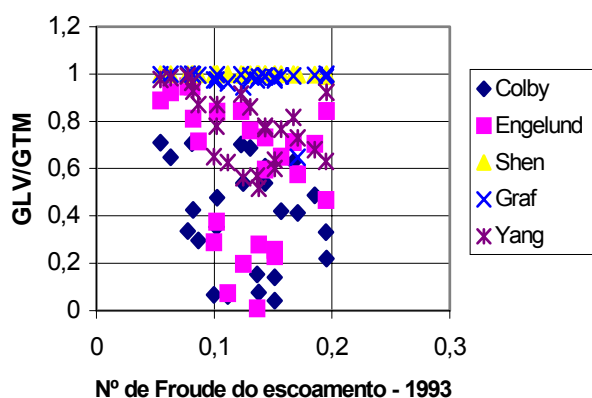


Figura 1 – Variação da relação (G_{LV}/G_{TM}) com o número de Froude do escoamento - 1993

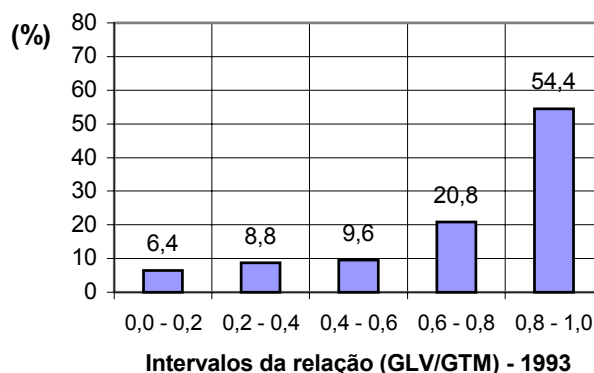


Figura 2 – Frequência da relação (G_{LV}/G_{TM})-1993

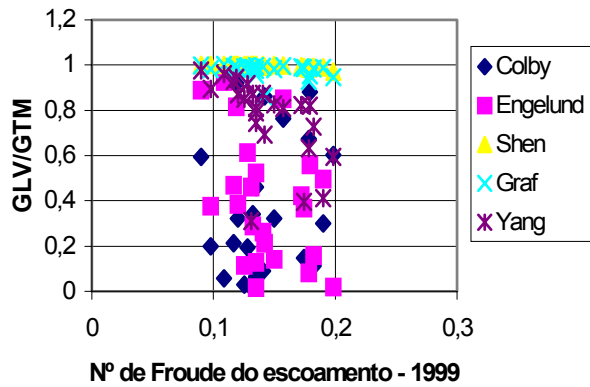


Figura 3 – Variação da relação (G_{LV}/G_{TM}) com o número de Froude do escoamento - 1999

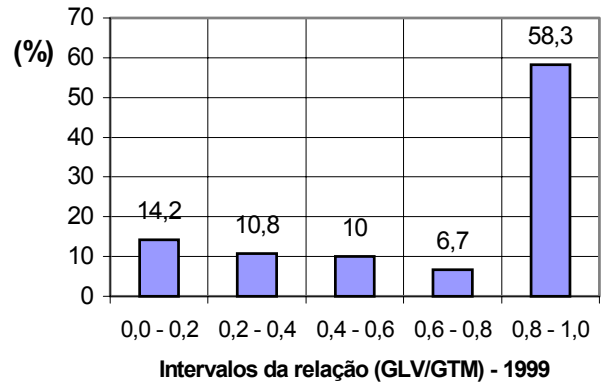


Figura 4 – Frequência da relação (G_{LV}/G_{TM})-1999

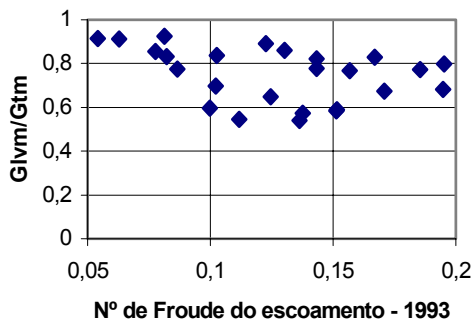


Figura 5 – Variação da relação (G_{LVm}/G_{TM}) o número de Froude do escoamento - 1993

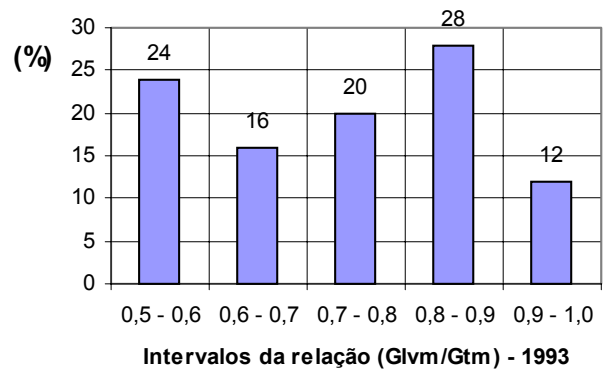


Figura 6 – Frequência da relação (G_{LVm}/G_{TM})-1993

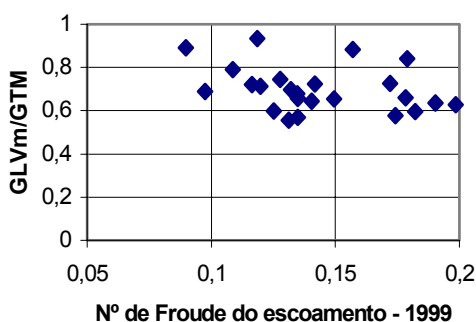


Figura 7 – Variação da relação (G_{LVm}/G_{TM}) o número de Froude do escoamento - 1999

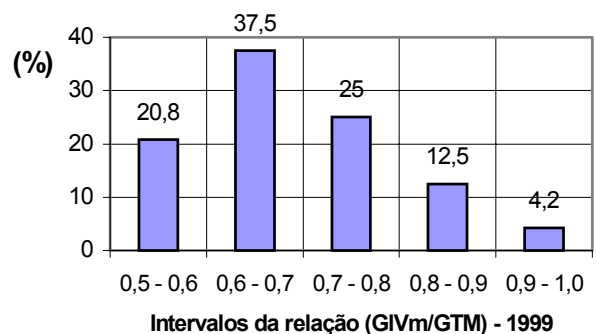


Figura 8 – Frequência da relação (G_{LVm}/G_{TM})-1999

No Quadro 3, apresentam-se os valores médios da carga de lavagem, e as relações $[(G_{LV}/G_{TM}).100]$ obtidas, aplicando os métodos e equações selecionadas para o cálculo da carga total do leito, referentes aos anos de 1993 e 1999. No ano de 1993 verificou-se que 74,8% da carga

total medida na seção de medições foi carga de lavagem, e em 1999 a parcela da carga de lavagem representou 70,0% da carga total.

Chow (1964) afirmou que a carga de lavagem pode representar de 80 a 90% da carga total. Ao analisar os valores médios da relação $[(G_{LV}/G_{TM}).100]$, apresentados no Quadro 3, dependendo do método selecionado para o cálculo da carga total do fundo, pode-se chegar nos valores citados por Chow.

Nascimento et al. (2000) encontraram valores da carga de lavagem que variaram de aproximadamente 83 a 97% da carga total transportada pelo rio Atibaia, e Nascimento e Coiado (2000) verificaram que a carga de lavagem variou de aproximadamente 81% a 96,0% da carga total transportada pelo rio Atibaia, na seção considerada.

Quadro 3 – Carga de lavagem, e porcentagens da carga total medida.

Método	Ano	Carga de lavagem (ton/dia)	$(G_{LV}/G_{TM}).100$ (%)
		Média (DP)	Média (DP)
Método de Colby (1964)	1993	63,8 (± 78,3)	40,3 (± 22,5)
	1999	344,2 (± 750,6)	35,9 (± 29,3)
Método de Engelund y Hansen (1967)	1993	91,1 (± 124,1)	58,7 (± 39,9)
	1999	183,7 (± 441,8)	29,2 (± 27,5)
Equação de Shen e Hung (1972)	1993	146,9 (± 169,3)	99,9 (± 0,2)
	1999	516,9 (± 884,8)	100,0 (± 0,1)
Método de Graf e Acaroglu (1968)	1993	141,4 (± 165,4)	97,0 (± 7,0)
	1999	497,4 (± 849,7)	98,0 (± 3,0)
Método de Yang (1973)	1993	110,5 (± 132,3)	78,0 (± 15,0)
	1999	368,4 (± 687,0)	77,0 (± 18,2)
Valores médios	1993	110,7	74,8
	1999	382,1	70,0

Nas Figuras 9 e 10 apresentam os valores dos diâmetros dos sólidos transportados em suspensão, respectivamente, referentes aos anos de 1993 e 1999. Observa-se que todos os valores são inferiores ao valor 0,0625 mm, valor limite entre areia muito fina e silte grosso. Ou seja, todos os sólidos transportados em suspensão, em 1993 e 1999, são inferiores ao silte grosso. Em 1993 a média dos valores dos sólidos transportados em suspensão foi 0,0214mm, e em 1999 foi 0,0265mm.

Considerando que uma parcela expressiva da carga transportando em suspensão é carga de lavagem, os valores encontrados confirmam citações bibliográficas. Segundo Raudkivi (1976) a carga de lavagem é definida como os sedimentos transportados pelo fluxo com diâmetro inferior a 0,0625 mm, e segundo Alvarez E Flores (1996), quando não se conhece o tamanho das partículas do fundo, aquelas transportadas em suspensão menores que 0,062mm são consideradas material da carga de lavagem.

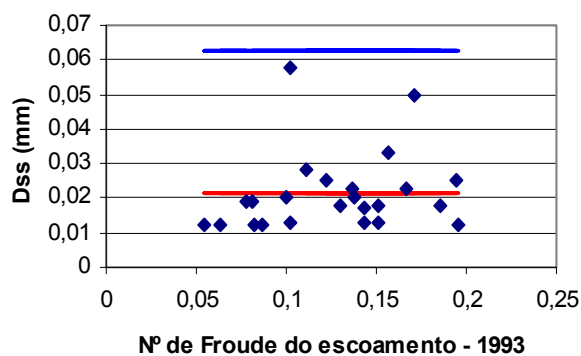


Figura 9 – Variação dos valores do diâmetro dos sólidos em suspensão com o número de Froude do escoamento - 1993

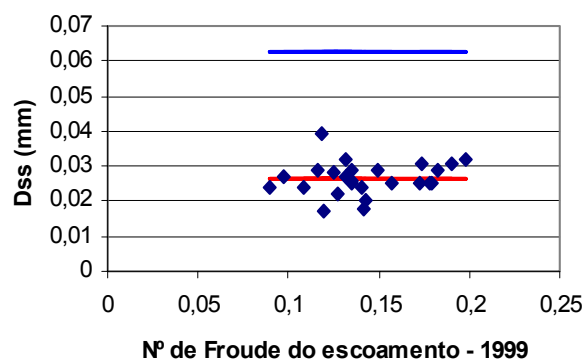


Figura 10 – Variação dos valores do diâmetro dos sólidos em suspensão com o número de Froude do escoamento - 1999

4.4 – A carga de lavagem e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte

No Quadro 4 são apresentadas as comparações entre a carga de lavagem específica, e a carga de sedimento produzida na bacia hidrográfica contribuinte, calculada pela EUPS. Para verificar os efeitos da ocupação da terra e do estado de conservação do solo, comparam-se os valores referentes a 1993 e 1999. No período a bacia hidrográfica sofreu intensa ação antrópica, principalmente pela expansão urbana.

Considerando os valores médios verifica-se que no ano de 1993 somente 5,90% dos sólidos produzidos na bacia hidrográfica contribuinte passaram pela seção de medições. No ano de 1999 a porcentagem aumentou consideravelmente, passando para 19,12%.

Por outro lado, as precipitações anuais, foram em 1993 (1568,6 mm), e em 1999 (1257,8 mm). Assim, embora em 1999 a precipitação anual foi inferior à de 1993, ocorreu um aumento expressivo da carga de lavagem na seção de medições. Isto em parte deveu-se ao aumento do fator chuva, que em 1993 obteve-se um valor médio de 7575,8 (MJ.mm/ha.h), e em 1999 de 8685,5 (MJ.mm/ha.h), o que representa um aumento de 14,6 %. Em 1999 o total de chuva foi menor, mas provavelmente ocorreram chuvas mais intensas. Isto pode ser comprovado por valores da carga total medida. Em 1999 somente num dia (11/3/1999) passou pela seção de medições 3859 ton/dia, enquanto o total de sedimentos que passou em todo o ano de 1993 foi de 3680 ton/dia. Outro impacto, responsável pelo aumento da carga de lavagem na seção de medições, e o mais importante, foi o aumento da área urbana que passou de 6% para 9% da área total da bacia hidrográfica contribuinte, o que resultou num aumento de 50% de 1993 para 1999.

Quadro 4 – Carga de lavagem e carga de sedimentos produzida na bacia hidrográfica contribuinte.

Método utilizado no cálculo da carga total do leito para determinar a carga de lavagem	1993			1999		
	Método t/ha	EUPS t/ha	(%)	Método t/ha	EUPS t/ha	(%)
Método de Colby (1964)	0,25	7,30	3,42	1,34	7,80	17,20
Método de Engelund y Hansen (1967)	0,36	7,30	4,90	0,72	7,80	9,20
Equação de Shen e Hung (1972)	0,57	7,30	7,90	2,02	7,80	25,9
Método de Graf e Acaroglu (1968)	0,55	7,30	7,60	1,94	7,80	24,90
Método de Yang (1973)	0,43	7,30	5,90	1,44	7,80	18,40
Valores médios	0,42	7,30	5,90	1,49	7,80	19,12

5 – CONCLUSÕES

Da análise dos resultados referentes à carga de lavagem que escoou pela seção de medições, e dos sedimentos produzidos na bacia hidrográfica contribuinte pode-se tirar as seguintes conclusões, mais importantes:

Dos métodos utilizados no cálculo da carga total do leito para se determinar a carga de lavagem, o método de Yang (1973) foi o que apresentou dispersões menores dos valores da relação (G_{LV}/G_{TM}) quando relacionados com o número de Froude do escoamento. Os valores obtidos com este método são os que mais se aproximaram da média resultante da aplicação de todos os métodos. Portanto é o mais recomendado para o caso.

No ano de 1993 verificou-se que 74,8% da carga total medida na seção de medições foi carga de lavagem, e em 1999 a parcela da carga de lavagem representou 70,0% da carga total medida.

Cem por cento dos sólidos transportados em suspensão apresentaram diâmetros inferiores ao do silte grosso (0,0625 mm). Em 1993 a média dos valores dos sólidos transportados em suspensão foi 0,0214 mm, e em 1999 foi 0,0265 mm. Isto vem corroborar com as definições de carga de lavagem apresentadas por Raudkivi (1976), e Alvarez e Flores (1996), já que mais de 70% da carga total transportada em suspensão, na seção de medições, era carga de lavagem.

Considerando os valores médios verificou-se que no ano de 1993 somente 5,90% dos sólidos produzidos na bacia hidrográfica contribuinte passaram pela seção de medições. No ano de 1999 a porcentagem aumentou consideravelmente, passando para 19,12%.

Embora em 1999 a precipitação anual foi inferior à de 1993, ocorreu um aumento expressivo da carga de lavagem na seção de medições. Isto em parte deveu-se ao aumento do fator chuva, que teve um acréscimo de 14,6% de 1993 para 1999.

Outro impacto responsável pelo aumento da carga de lavagem na seção de medições, o mais importante, foi o aumento da área urbana que passou de 6% para 9% da área total da bacia hidrográfica contribuinte, o que resultou num aumento de 50%, de 1993 para 1999.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelos recursos financeiros concedidos para o desenvolvimento das pesquisas que resultaram este artigo.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVAREZ, José Antonio M., FLORES, Manuel G. (1996). *Transporte de Sedimentos*. México, Instituto de Ingeniería. ISSN 0185-2345. 531p.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (1990). *Conservação do Solo*. Ícone Editora, Barra Funda, SP.

BREA, J. D., SPALLETI, P. D. (1998). “*Producción de Sedimentos en Cuencas de Ríos de Montana*”. Anais do XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. AIIH – Asociación Internaional de Investigaciones Hidráulicas. Guayaquil Vol. 2, pp:205-213. Oaxaca, México, 1998.

CARVALHO, Newton de O. (1994). *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 372p. el. CDU 556.51.

CHOW, Ven T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill. 63-13931, 502p.

ECKHARDT, Márcia (1998). *Estimativa do Transporte de Sedimentos em Escoamento com Superfície Livre pelo Método de Toffaleti*. Rio de Janeiro: COPPE.UFRJ, 1998. 143p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro).

FIGUEIREDO, Ademir G. A (1993). *Dinâmica da Produção e Transporte de Sedimentos em Suspensão na Bacia do Rio Aguapeí*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993, Vol. I. 397p. Tese (Doutorado em Engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).

GARDE, R. J., RAJU, R. K. G. (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. 2nd Edition. New York. John Wiley & Sons. 84-22539. 618p.

GRAF, Walter H.(1971). *Hydraulics of Sediment Transport*. New York, McGraw-Hill. 79-128788.1. 513p.

NASCIMENTO, A. P.; COIADO, E. M.; MARTINS, M. E. (2000). *Estimativa da carga de lavagem transportada pelo rio Atibaia*. Anais do XIX Congreso Lanino Americano de Hidráulica ,Anais, Cordoba, Argentina, Outubro de 2000.

NASCIMENTO, A. P.; COIADO, E.M. (2000). *Análise sobre a Representatividade da Carga de Lavagem em Escoamento a Superfície Livre – Rio Atibaia*. Anais do IV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Santa Maria, RS. Novembro de 2000.

- RAUDKIVI, A. J. (1976). *Loose Boundary Hydraulics*. 2nd Edition. Oxford. Pergamon Press. 75-22347. 397p.
- SIMONS, Daryl B., SENTÜRK, F. (1992). *Sediment Transport Technology*. Colorado. U.S. Water Resources Publications. ISBN: 0-918334-66-7. 897p.
- SIVIERO, Maria Rejane Lourençoni. (2003). Estudo da Ocupação do Solo a Montante de uma Seção do Rio Atibaia Associada à Descarga Sólida Transportada. Campinas: UNICAMP, 2003. 116P. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos).
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D.D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning*. Agriculture Handbook, nº 537. Washington, U.S.D.A. Department of Agriculture. 58p.
- YANG, Ted C. (1996). *Sediment Transport Theory and Practice*. New York. McGraw-Hill Companies. ISBN 0-07-912265-5. 395p.